

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ КОНТАКТНОЙ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ

Е. В. ШАПОВАЛОВ¹, Р. М. ГАЛАГАН², Ф. С. КЛИЩАР¹

¹ Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

² Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев

Исследована возможность применения метода АЭ для контроля контактной точечной сварки. Разработаны специализированная система приема и обработки сигналов АЭ и критерии, позволяющие синтезировать показатель качества такого соединения. Предложено для формирования показателя качества сварного точечного соединения использовать метод свертки шаблонного сигнала и сигнала, полученного при контроле текущей сварной точки.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, контактная точечная сварка, качество, контроль.

Постановка задачи. Контактная точечная сварка (КТС) – один из наиболее распространенных способов получения неразъемных соединений, используемых в автомобиле-, судо-, приборостроительной и других областях промышленности. К точечным сварным соединениям предъявляют повышенные требования по надежности и стабильности качества, для обеспечения которых используют различные методы контроля. Повысить их качество можно, контролируя режимы работы сварочного оборудования: сварочный ток, падение напряжения между электродами, усилие их сжатия, сопротивление точки сварки и т.п. Другой подход – контроль процесса сваривания с применением методов неразрушающего контроля (НК): ультразвукового, теплового, вихревого и пр. [1]. К традиционным методам НК сваривания в последнее время дополнительно вводят акустико-эмиссионный (АЭ). Однако его применение ограничивается рядом факторов, один из которых – сложность надежного и однозначного приема сигналов АЭ на фоне шумов, обусловленных работой сварочного оборудования. Этот метод развит в работах [2, 3], где проанализированы источники сигналов АЭ и шумов, на фоне которых эти сигналы необходимо выявлять, а также даны рекомендации по выбору места установки датчиков АЭ. Предложено [4] использовать “теорию фракталов” для описания характеристик сигналов АЭ. Исследованы [5] сигналы АЭ, возникающие при формировании литого ядра. Результаты этих экспериментов свидетельствуют о перспективности метода АЭ для контроля качества точечного соединения. Однако из-за отсутствия специализированного оборудования и критериев, на основании которых можно было бы прогнозировать его качество по результатам анализа сигналов АЭ, не удастся в полной мере использовать возможности метода для контроля КТС.

Цель работы – создать эффективную методику обработки информативных параметров сигналов АЭ, возникающих в процессе КТС, и синтеза критерия качества точечного соединения.

Результаты и их обсуждение. Процесс формирования соединения можно разделить на четыре этапа (рис. 1) [6, 7]: 1 – от начала сжатия деталей электродами усилием F_e до начала импульса тока I_{weld} ; 2 – от начала импульса тока I_{weld} до

начала расплавления металла в контакте деталь–деталь (до начала формирования ядра); 3 – от начала формирования ядра диаметром d_{core} в контакте деталь–деталь до окончания импульса сварочного тока I_{weld} ; 4 – от окончания импульса сварочного тока I_{weld} до снятия усилия F_e сжатия деталей электродами.

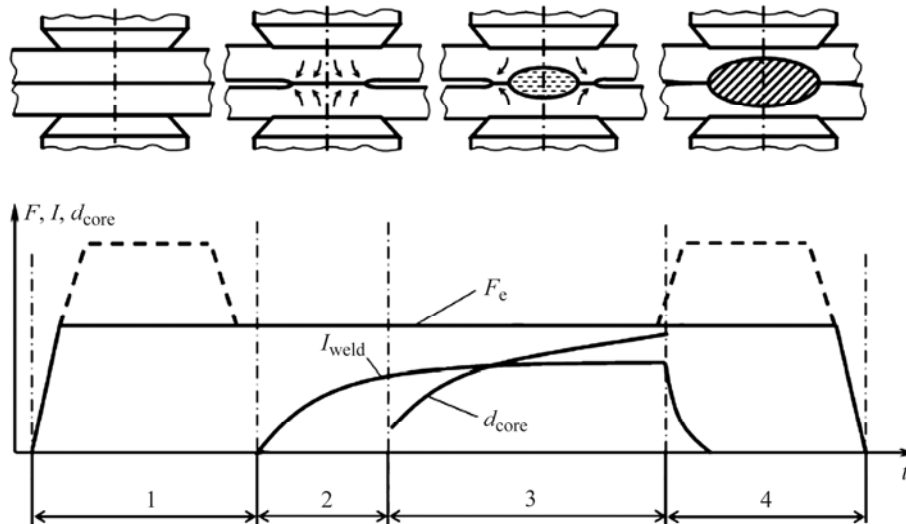


Рис. 1. Этапы образования соединения при КТС.

Fig. 1. Stages of formation of the compound in resistance spot welding.

Здесь наиболее интересен четвертый этап, поскольку в это время металл в зоне сварки охлаждается и кристаллизуется в ядре. Поэтому его параметры определяют эксплуатационные свойства точечного сварного соединения. При охлаждении уменьшается объем металла и возникают остаточные напряжения и деформации. На этом этапе одновременно сочетаются экстремальные условия: сформировано расплавленное ядро, существует максимально напряженное состояние металла и резко уменьшается ток сварки. Создан [8] специализированный стенд для исследования сигналов АЭ и описаны его технические характеристики, программное обеспечение, электронные тракты, а также первичный преобразователь.

В экспериментах использовали низкоуглеродистую сталь марки 10 толщиной 0,5 mm. Выявили, что после прекращения подачи тока сварки (в момент времени 0,65 s) возникает сигнал АЭ относительно небольшой амплитуды и длительностью не более 0,05 s, что соответствует длительности аллотропических и фазовых превращений металла литого ядра. Сигналы АЭ на этом отрезке времени для качественного и некачественного сварного соединения существенно отличаются. Для разработки показателя качества предложено использовать операцию свертки, с помощью которой можно определить, имеется ли в анализируемом дискретном сигнале $x[n]$ другой сигнал, заданный шаблоном $h[m]$:

$$Y_{xh}[n] = \sum_{m=0}^n x[m]h[n-m],$$

где Y_{xh} – выход (сигнал свертки); n – текущий индекс дискретного сигнала; m – размер шаблона, соответствующий количеству тактов дискретизации анализируемого сигнала (база шаблона).

На основе метода свертки предложены два способа обработки сигнала АЭ. Первый использует линейные его преобразования, когда спектр сигнала рассчитывают с помощью процедуры быстрого преобразования Фурье. Во втором приме-

няют нелинейные его преобразования: пороговую фильтрацию, бинаризацию и медианную фильтрацию. Для реализации первого способа на основании многократных измерений и усреднений сформирован частотный шаблон (рис. 2). Установлено, что информативные составляющие спектра АЭ сигнала для заданных условий эксперимента находятся в окрестностях пяти частот: 100 kHz; 120; 160; 240 и 330 kHz.

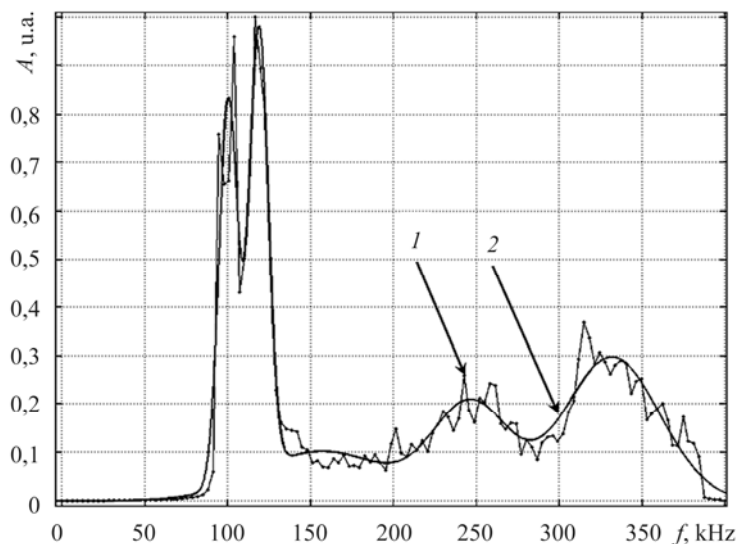


Рис. 2. Образцовый шаблон в частотной области, полученный из эксперимента (1) и аппроксимацией непрерывными функциями (2).

Fig. 2. Exemplary pattern in the frequency domain, obtained from experiments (1) and by approximating continuous functions (2).

Приведены (рис. 3а) результаты расчета показателя качества с использованием частотного шаблона при удовлетворительном и неудовлетворительном формировании литого ядра. Несмотря на высокий уровень постоянной составляющей в выходном сигнале, при удовлетворительном формировании сварной точки наблюдается хорошо различимый импульс амплитудой U_q . Для его выделения дополнительно обрабатывали выходной сигнал – вводили временное окно длительностью 0,15 s и фиксировали опорный уровень сигнала в момент прекращения подачи тока сварки. Так получили достаточно надежный признак отсутствия формирования литого ядра.

Для разработки показателя качества точечного соединения с использованием нелинейных преобразований сигнала АЭ создан образцовый шаблон во временной области (рис. 4), который, собственно, является временным процессом, который должен присутствовать в сигнале АЭ при качественном формировании сварной точки. Длительность шаблона 0,072 s. Приведены (рис. 5) результаты расчета показателя качества с его помощью при удовлетворительном и неудовлетворительном формировании литого ядра. Очевидно, что сигнал с выхода датчика АЭ случайный. Однако при качественной контактной сварке на кривой показателя качества имеется ярко выраженный пик, который синхронизирован с моментом прекращения подачи сварочного тока. Для этого способа также предложено использовать дополнительную обработку выходного сигнала – сглаживание во временном окне длительностью 0,15 s и фиксация опорного уровня в момент выключения тока сварки, что позволяет достаточно надежно прогнозировать отсутствие формирования литого ядра.

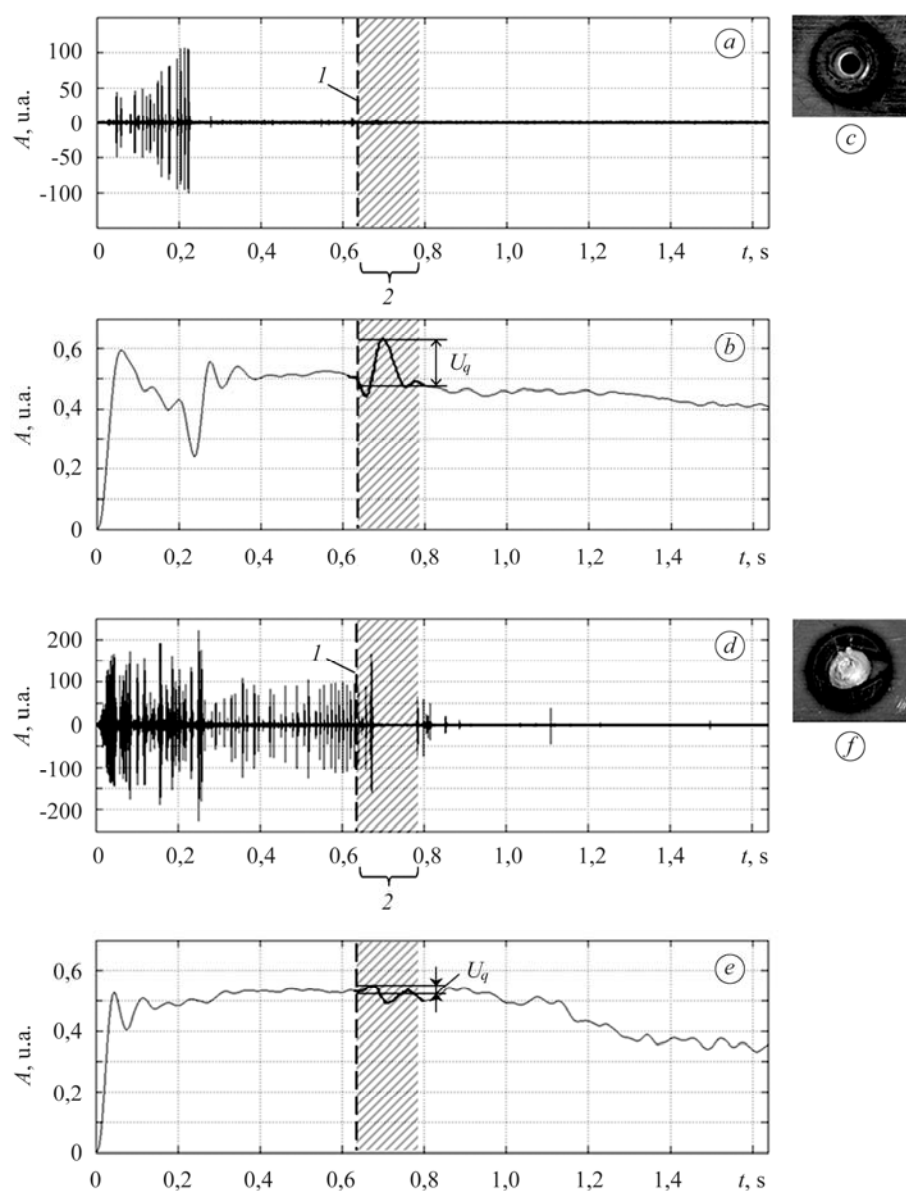


Рис. 3. Формирование показателя качества с помощью частотного шаблона для качественной ($a-c$) и некачественной ($d-f$) сварной точки: a, d – сигнал АЭ; b, e – кривая показателя качества; c, f – изображение сварного соединения после разрушения; I – момент времени прекращения подачи тока сварки; 2 – временное окно принятия решения.

Fig. 3. Formation of the quality index through a frequency template for the quality ($a-c$) and low quality ($d-f$) weld points: a, d – AE signal; b, e – quality index curve; c, f – image of the weld joint after fracture; I – time of the welding current supply stop; 2 – decision time window.

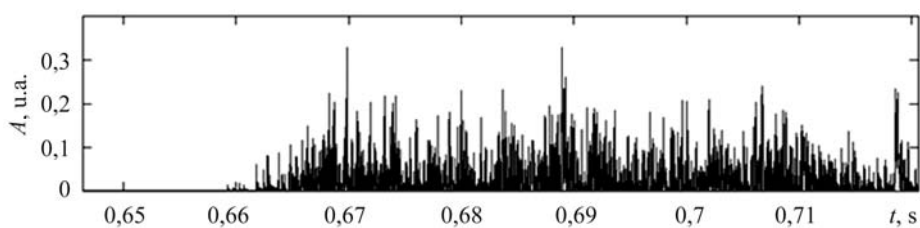


Рис. 4. Образцовый временной шаблон.

Fig. 4. Exemplary timestamp.

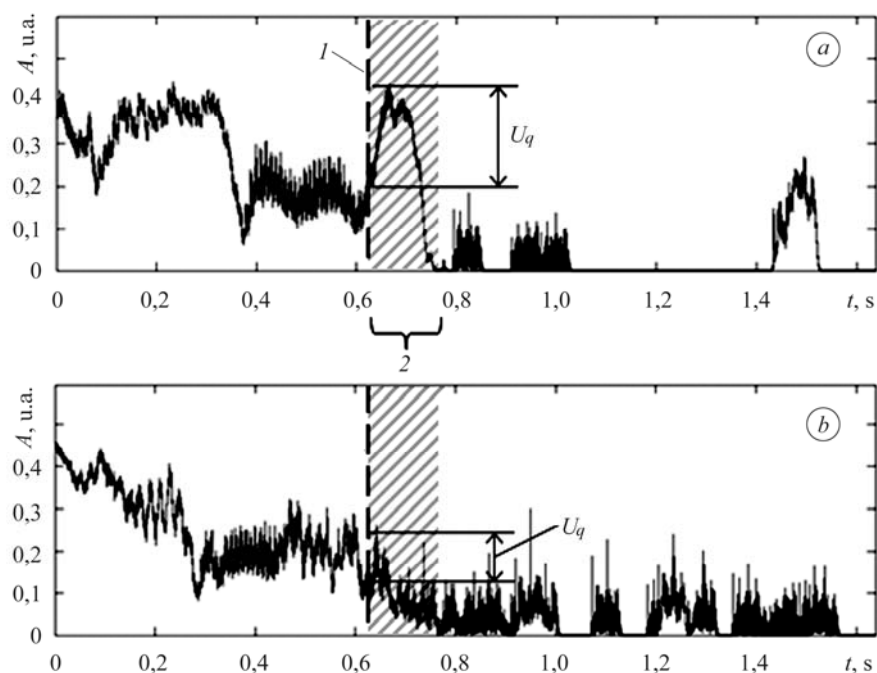


Рис. 5. Формирование показателя качества с помощью временного шаблона: *a* – для качественной сварной точки; *b* – для некачественной; *I* – момент времени прекращения подачи тока сварки; 2 – временное окно принятия решения.

Fig. 5. Formation of the quality index using the time pattern:
a – for the quality weld point; *b* – for the low quality;
I – time stopping delivery of the welding current;
 2 – decision time window.

ВЫВОДЫ

Экспериментальные исследования сигналов АЭ, которые возникают в процессе КТС, подтвердили возможность применения предложенного критерия качества соединения, основанного на использовании метода свертки шаблонного сигнала, характеризующего качественное соединение, и сигнала, полученного при контроле текущей сварной точки. Предложено для анализа сигналов АЭ использовать временное окно длительностью 0,15 s, начало которого соответствует моменту прекращения импульса сварочного тока. Показано, что о качестве точечного сварного соединения можно судить по величине пика, который возникает на выходе блока свертки в анализируемом временном окне.

РЕЗЮМЕ. Досліджена можливість застосування методу АЕ для контролю контакт-ного точкового зварювання. Розроблені спеціалізована система прийому та обробки сиг-налів АЕ та критерії, за якими можна синтезувати показник якості точкового зварного з'єднання. Запропоновано для формування показника якості такого з'єднання використо-вувати метод згортки шаблонного сигналу, що характеризує якісне з'єднання, і сигналу, отриманого під час контролю поточної зварної точки.

SUMMARY. The possibility of application of the acoustic emission method for the control of spot welding resistance is investigated. A specialized system for receiving and processing the AE signals and criteria to measure the quality of a weld joint is developed. It is proposed to use for formation of the weld quality index point of such welding the convolution signal method, characterizing the welding quality and a signal obtained by controlling the current welding point.

1. *Разработка алгоритма работы системы контроля и управления процессом контактной точечной сварки* / Е. В. Шаповалов, Р. М. Галаган, Ф. С. Клишар, В. И. Запара // Вісник Нац. техн. ун-ту України "КПІ". Сер. приладобудування. – 2012. – № 44. – С. 49–57.
2. *Effect of various sensor setting up for acoustic emission detection during resistance spot wel- ding* / I. Polajnar, E. Esmail, T. Kek, J. Grum // The 10th Int. Conf. of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing "Application of Contemporary Non-Destructive Testing in En- gineering": conference proceedings. – Ljubljana, Slovenia, 2009. – P. 399–406.
3. *Polajnar I., Grum J., and Esmail E. Sources of acoustic emission in resistance spot welding* // Int. Conf. "DEFEKTOSKOPIE 2008": conference proceedings, November 4–6, 2008. – Brno, Czech Republic, 2008. – P. 187–194.
4. *Identification of acoustic emission signal in aluminum alloys spot welding based on fractal theory* / Luo Zhen, Luo Baofa, Shan Ping et al. // China welding. – 2007. – **16**, № 3. – P. 51–55.
5. *Klyosumphan T. and Prateepasen A. Monitoring nugget formation of nickel-alloys in micro spot welding using acoustic emission* // Key Engng Mat. – 2004. – **270-273**. – P. 510–517.
6. *Технология и оборудование контактной сварки: Уч. для машиностроительных вузов* / Б. Д. Орлов, А. А. Чакалев, Ю. В. Дмитриев и др.; Под общ. ред. Б.Д. Орлова. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с.
7. *Козловский С. Н. Основы теории и технологии программированных режимов контакт- ной точечной сварки.* – Красноярск: СибГАУ, 2006. – 260 с.
8. *Разработка системы анализа сигналов акустической эмиссии, возникающих в про- цессе контактной точечной сварки* / Е. В. Шаповалов, В. В. Долиненко, Р. М. Галаган, Ф. С. Клишар // Вісник інж. академії України. – 2012. – № 3–4. – С. 155–159.

Получено 14.06.2013